

**А. А. Орлов\*, О. З. Пожого, А. Е. Иванов<sup>1</sup>**

Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет), г. Москва

\*ixg2094@mail.ru

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук С. В. Сковцова

## **ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОРТОРОМБИЧЕСКОГО СПЛАВА**

В работе исследовано влияние дополнительного легирования водородом на сопротивление деформации орторомбического сплава. Установлено оптимальное содержание водорода, введенного в сплав, для снижения сопротивления деформации.

*Ключевые слова:* интерметаллид  $Ti_2AlNb$ , легирование водородом, фазовый состав, структура, деформация

**A. A. Orlov, O. Z. Pozhoga, A. E. Ivanov**

## **EFFECT OF ADDITIONAL HYDROGEN ALLOYING ON THE DEFORMATION RESISTANCE OF THE ORTHORHOMBIC ALLOY**

In the work carried out to study the effects effect of additional hydrogen alloying on the deformation resistance of the orthorhombic alloy. The optimal content of hydrogen introduced into the alloy to reduce the deformation resistance is established.

*Key words:*  $Ti_2AlNb$  intermetallic, hydrogen alloying, phase composition, structure, deformation

Известно [1], что дополнительное легирование титановых сплавов водородом облегчает процесс их деформационной обработки, позволяя либо уменьшить усилия деформирования при той же температуре, либо снизить на 100–200 °С температуру деформации. В данной работе было исследовано влияние дополнительного легирования водородом на деформируемость сплава на основе интерметаллида  $Ti_2AlNb$ .

Исследования проводили на образцах, вырезанных из горячекатаного прутка сплава ВТИ-4, с исходным содержанием водорода — 0,006 % и наводороженных до 0,2, 0,3 и 0,4 %. Сопротивление деформации определяли при испытаниях на сжатие в изотермических условиях при тем-

пературе 950 °С и скорости деформации  $\dot{\epsilon}_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , по результатам которых строилась зависимость удельного усилия осадки ( $q$ ) от относительной степени деформации ( $\epsilon = \Delta H/H_0$ ) (рис. 1).

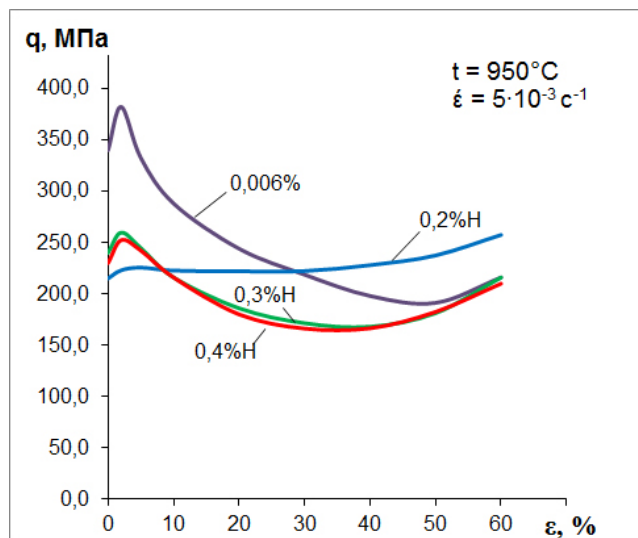


Рис. 1. Зависимость усилий деформации от степени деформации сплава ВТИ-4 с различным содержанием водорода при температуре испытаний на сжатие 950 °С. Скорость деформации  $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$

В проведенных ранее исследованиях [2] было определено, что при температуре испытания сплав с исходным содержанием водорода является двухфазным ( $\beta + \text{O}$ ), а фазовый состав сплава, легированного водородом, представлен тремя фазами ( $\beta$ ,  $\text{O}$  и  $\alpha_2$ ), причем в сплаве с 0,2 %Н содержится очень небольшое количество  $\alpha_2$ -фазы (до 10 %), с увеличением содержания водорода количество  $\beta$ -фазы уменьшается, а  $\text{O}$  и  $\alpha_2$ -фаз — увеличивается.

Начальное усилие деформирования для образцов с исходным содержанием водорода составило 340 МПа, что более чем на 100 МПа больше, чем для наводороженных образцов: 0,2 % — 215 МПа, 0,3 % — 240 МПа, 0,4 % — 230 МПа.

На начальной стадии пластической деформации для сплава с исходным содержанием водорода наблюдается деформационное упрочнение и значение усилия осадки возрастает до 382 МПа.

Дальнейшее увеличение степени деформации до 20 % сопровождается интенсивным деформационным разупрочнением, обусловленным, по-видимому, протеканием процессов рекристаллизации  $\text{O}$ -фазы по аналогии с промышленными титановыми сплавами. Усилие осадки

уменьшается в 1,6 раз до 244 МПа. При более высоких степенях деформации наблюдается переход к более пологому участку кривой течения, сопровождающийся дальнейшим снижением усилий деформации, что свидетельствует о снижении интенсивности рекристаллизационных процессов и деформационного разупрочнения. Минимальное значение усилий осадки составляет 191 МПа при степени деформации 50 %. Дальнейшая деформация приводит к усилению влияния контактного трения, приводящему к росту удельных усилий. Таким образом, при испытании на сжатие сплава ВТИ-4 с исходным содержанием водорода в исследованных температурно-скоростных условиях деформации усилия осадки снижаются в 2 раза.

При внешнем осмотре образца с исходным содержанием водорода после испытания на осадку обнаруживается наличие мелких трещин в меридиональном направлении, свидетельствующих о недостаточном запасе пластичности сплава при деформации со степенью более 50 % при температуре 950 °С.

Зависимость  $q(\epsilon)$  для сплава, легированного 0,2 % Н, имеет другой характер. На начальной стадии деформирования ( $\epsilon = 1-5\%$ ) удельные усилия несколько увеличиваются с 215 до 226 МПа.

При степенях деформации  $\epsilon > 5\%$  наблюдается переход от начального участка кривой течения, характеризующего деформационное упрочнение, к более пологому, соответствующему стадии установившегося течения. Среднее значение удельных усилий на данном участке составляет 222 МПа.

Почти полное отсутствие разупрочнения в процессе деформации сплава с 0,2 % Н обусловлено затруднением процессов рекристаллизации и пластического течения вследствие большего количества дефектов из-за наличия  $\alpha_2$ -фазы в структуре сплава. Основным механизмом релаксации напряжений на этом участке кривой течения служит процесс динамического возврата, эффективность которого существенно меньше, чем эффективность процесса динамической рекристаллизации. При степенях деформации  $\epsilon > 50\%$  значение усилия осадки возрастает вследствие усиления влияния контактного трения. Таким образом, на характер изменения сопротивления деформации сплава ВТИ-4, легированного 0,2 % Н, при температуре 950 °С большое влияние оказывает наличие гетерогенной структуры, которая, несмотря на большее количество пластичной  $\beta$ -фазы при этой температуре, препятствует деформационному разупрочнению.

После проведенного испытания на поверхности осаженного образца не обнаружилось каких-либо дефектов в отличие от образца с ис-

ходным содержанием водорода при тех же степенях деформации, что позволяет судить о благоприятном влиянии водорода на деформацию сплава ВТИ-4.

Деформационное поведение сплава, легированного 0,3 и 0,4 % Н, схоже с зависимостью  $q(\epsilon)$  для сплава с исходным содержанием водорода. На начальной стадии деформирования наблюдается деформационное упрочнение, при этом усилие осадки повышается с 240 до 260 МПа для сплава с 0,3 % Н и с 230 до 252 МПа для сплава с 0,4 % Н. На участке кривой, соответствующей степеням деформации  $\epsilon = 5\text{--}20\%$ , происходит деформационное разупрочнение, однако интенсивность его меньше, чем на аналогичном участке кривой для сплава с исходным содержанием водорода. Удельные усилия снижаются в 1,4 раза до 186 и 180 МПа, соответственно, для сплава с 0,3 % и 0,4 % Н.

С увеличением степени деформации до  $\epsilon = 40\%$  сплав также демонстрирует меньшие значения удельных усилий, и на данном участке наблюдается стадия установившегося течения — удельные усилия остаются на уровне 165—170 МПа. При степени деформации  $\epsilon > 50\%$  усиливается влияние контактного трения, и усилие осадки повышается. Таким образом, снижение удельных усилий при деформации сплава с 0,3 и 0,4 % Н составляет  $\sim 1,5$  раза, что немногим ниже разницы удельных усилий деформирования, полученным для сплава с исходным содержанием водорода.

Снижение усилий осадки в процессе деформации образцов с 0,3 и 0,4 % Н объясняется образованием глубоких раскрывшихся трещин на боковой поверхности в меридиональном направлении, что свидетельствует о хрупком разрушении образцов при увеличении степени деформации  $\epsilon > 5\%$ , сопровождающимся снижением удельных усилий. Хрупкое разрушение образцов обусловлено меньшей объемной долей пластичной  $\beta$ -фазы и большим количеством  $\alpha_2$ -фазы в сплаве ВТИ-4 с 0,3 и 0,4 % Н по сравнению со сплавом, легированным 0,2 % Н. Частицы интерметаллидных фаз затрудняют движение дислокаций и осуществление пластического течения, приводя к охрупчиванию сплава.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для снижения сопротивления деформации целесообразно вводить в сплав ВТИ-4 не более 0,2 % Н во избежание его охрупчивания с одновременным достижением наименьших значений деформирующих усилий.

*Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.*

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин [и др.] М. : МИСиС, 2002. 392 с.
- 2 Влияние температуры нагрева под закалку на изменение фазового состава и структуры сплава ВТИ-4, дополнительно легированного водородом / А. А. Орлов [и др.] // Гагаринские чтения — 2018: XLIV Международная молодежная научная конференция : сборник тезисов докладов. М. : Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), 2018. С. 347–348.